ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2019;19(10):2463-2469

Slip Length of the Nanocomposite Coating in Laminar Flow

ARTICLE INFO

Article Type
Original Research

Authors
Saadat Bakhsh M.[1] *PhD,*
Mohammad Nouri N.*[1] *PhD*

How to cite this article
Saadat Bakhsh M, Mohammad Nouri N. Slip Length of the Nanocomposite Coating in Laminar Flow. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(10):2463-2469.

[1]Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Mechanical Engineering Faculty, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
mnouri@iust.ac.ir

Article History
Received: April 6, 2018
Accepted: February 13, 2019
ePublished: October 22, 2019

ABSTRACT

The superhydrophobic surfaces have many applications, including skin friction reduction, anti-icing, anti-fouling, and self-cleaning surfaces. Also, with the precise design of these surfaces, it is possible to increase the heat transfer coefficient in the condensation heat transfer. In recent years, a variety of methods have been proposed for the fabrication of the superhydrophobic surfaces, some of which are very complex and not applicable for industrial uses. In this paper, a nanocomposite superhydrophobic coating is produced in a simple and applicable way for large surfaces. Using this method, a superhydrophobic surface with surface structures in multi-scale and with a sliding angle of less than 5 degrees is obtained. After evaluating the specification of superhydrophobic surfaces, slip length measurement of the coating is performed using a fabricated measurement system. It should be noted that the slip length of the superhydrophobic surface is a characteristic feature of these surfaces and always its measurement is associated with challenges. In this research, the slip length of the created coating was measured by use of the proposed measurement system. The results show that the slip lengths of about 40-500 microns can be achieved by use of the proposed measurement system.

Keywords Superhydrophobic Surfaces; Slip Length; Hierarchical Structures

CITATION LINKS

[1] Super-hydrophobic surfaces: From natural ... [2] Superhydrophobic ... [3] A review on prognostic techniques ... [4] Recent developments in superhydrophobic surfaces ... [5] Electrospun poly (Styrene-block-dimethylsiloxane) block copolymer ... [6] Electrospinning of fluorinated polymers: Formation ... [7] Super-hydrophobic surfaces of layer-by-layer structured ... [8] Superhydrophobic to superhydrophilic transitions of sol–gel films for ... [9] Preparation of a super-hydrophobic poly (vinyl chloride) surface ... [10] Facile method to fabricate a large-scale superhydrophobic ... [11] Fabrication of a bionic superhydrophobic metal surface by sulfur ... [12] Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of ... [13] Tuneable rough surfaces: A new approach for elaboration of ... [14] A nonlithographic top-down electrochemical approach for creating hierarchical ... [15] Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior ... [16] Facile creation of a bionic super-hydrophobic block copolymer ... [17] Stable, superhydrophobic, and conductive polyaniline/polystyrene films for ... [18] Superhydrophobic composite films produced on various ... [19] Super-hydrophobic tin oxide ... [20] Super water-and oil-repellent surfaces resulting from ... [21] Hydrophobic monolayer coating on anodized aluminum ... [22] Superhydrophobic bionic surfaces with hierarchical microsphere/SWCNT ... [23] Highly transparent superhydrophobic surfaces from the coassembly ... [24] Transparent, thermally stable and mechanically robust superhydrophobic surfaces made from ... [25] Design of a superhydrophobic surface using woven ... [26] Facile creation of a super-amphiphobic coating surface with bionic ... [27] Artificial lotus leaf structures from assembling carbon nanotubes and ... [28] A general route to transform normal hydrophilic ... [29] Slip-length measurement of confined air flow using dynamic ... [30] Drag reduction in turbulent flows over ... [31] Robust superhydrophobic surface with polytetrafluoroethylene (PTFE), micro sized ... [32] Hydrophobic coating of aluminum flake particles and application ... [33] Using of an electric stepper motor to measure ... [34] Slip length measurement system of the superhydrophobic ... [35] Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar ... [36] Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface ...

Copyright© 2019, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

طول لغزش پوشش نانوکامپوزیت در جریان آرام

محمد سعادت‌بخش PhD
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
نوروز محمد نوری* PhD
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

چکیده
سطوح فوق آب‌گریز، دارای کاربردهای فراوانی از جمله کاهش پسای اصطکاکی، سطوح ضدیخ، ضدخزه و سطوح خودتمیز شونده هستند. همچنین با طراحی دقیق این سطوح می‌توان به افزایش ضریب انتقال گرما در انتقال گرمای چگالش دست یافت. در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی برای تولید سطوح فوق آب‌گریز ارائه شده که برخی از آنها بسیار پیچیده بوده و برای کاربردهای صنعتی دارای قابلیت‌های اجرایی چندانی نیستند. در این مقاله ابتدا نمونه‌ای از پوشش نانوکامپوزیت فوق آب‌گریز به روشی ساده و قابل اجرا برای سطوح بزرگ تولید می‌شود. با استفاده از این روش سطح فوق آب‌گریزی با ساختارهای سطحی در چند مقیاس و با زاویه لغزش کمتر از ۱±۵درجه به‌دست می‌آید. پس از ارزیابی مشخصات فوق آب‌گریزی به اندازه‌گیری طول لغزش سطح تولید شده پرداخته خواهد شد. لازم به ذکر است که طول لغزش سطوح فوق آب‌گریز مشخصه کاربردی این سطوح بوده که اندازه‌گیری آن همواره با چالش‌هایی همراه است. در این مقاله به کمک سیستم اندازه‌گیری ساخته شده، طول لغزش پوشش ایجاد شده اندازه‌گیری شده است. نتایج نشان دهنده آن است که به کمک روش ارائه‌شده برای تولید این سطوح، طول لغزش حدود ۵۰۰-۴۰میکرون قابل دستیابی خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: سطح فوق آب‌گریز، طول لغزش، ساختارهای سلسله‌ای

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۱۷
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴
*نویسنده مسئول: mnouri@iust.ac.ir

۱- مقدمه

امروزه سطوح فوق آب‌گریز، سطوحی با زاویه تماسی استاتیکی بزرگتر از ۱۵۰درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰درجه، به علت قابلیت‌های کاربردی خود در زمینه کاهش پسای اصطکاکی، سطوح ضد خزه، کاربردهای میکروفلویدیک، سطوح خودتمیزشونده، سطوح ضد یخ، و غیره توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند[1-4]. در سال‌های اخیر روش‌های متنوعی برای تولید این سطوح ارائه شده که برخی از آن‌ها بسیار پیچیده می‌باشند[5-15]. برخی از روش‌ها سطوح فوق آب‌گریز را روی زیرپایه‌های پلیمری[16-18]، سطوح فلزی[19-21]، شیشه[22-25]، چوب[26]، و پارچه[27, 28] تولید کرده‌اند. ساختارهای سطح (یا زبری‌های سطح) و ترکیب شیمیایی سطح (یا انرژی سطحی) دو پارامتر تعیین‌کننده در رفتار سطوح فوق آب‌گریز می‌باشند. ساختارهای سطحی با به دام‌انداختن هوا باعث افزایش عملکرد سطوح فوق آب‌گریز در مجاورت با جریان سیال می‌شوند. ترکیبات شیمیایی سطح نیز با داشتن مولکول‌های غیرقطبی باعث دفع مولکول‌های آب شده و در مجموع باعث بروز مشخصات فوق آب‌گریزی می‌شوند. نیاز به وجود این دو مشخصه باعث شده است که تعداد زیادی از روش‌های تولید سطوح فوق آب‌گریز برای استفاده در کاربردهای صنعتی غیرقابل استفاده باشند. از میان روش‌هایی که برای تولید سطوح در مقیاس کوچک مناسب می‌باشند، توجه زیادی بر روش‌هایی است که ساده بوده و امکان اجرا در مقیاس بزرگ را دارا باشند.

علاوه بر زاویه تماسی استاتیکی و زاویه لغزش، طول لغزش یکی دیگر از مشخصات مهم سطوح فوق آب‌گریز می‌باشد. این پارامتر مشخصه کاربردی سطوح فوق آب‌گریز بوده که اثربخشی و عملکرد این سطوح وابسته به مقدار کمی آن می‌باشد. بعلاوه به کمک اندازه‌گیری طول لغزش می‌توان میزان کاهش پسای اصطکاکی سطوح دارای لغزش را پیش‌بینی کرد. برای اندازه‌گیری طول لغزش روش‌ها و تجهیزاتی مثل میکروسکوپ نیروی اتمی[29] و سرعت‌سنجی به کمک ذرات[30] مورد استفاده قرار می‌گیرند. متداول‌ترین روش برای اندازه‌گیری طول لغزش استفاده از جریان داخلی با مرزهای فوق آب‌گریز بوده، که در آن به کمک سرعت‌سنجی ذرات، سرعت سیال مجاور دیواره و در نهایت طول لغزش اندازه‌گیری می‌شود. به عنوان مثال *دانیلو* و همکاران[30] از روش اندازه‌گیری سرعت ذرات برای اندازه‌گیری طول لغزش در جریان آرام و آشفته در یک کانال توسعه‌یافته استفاده کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده آن است که با افزایش عدد رینولدز جریان، مقدار کاهش پسای اصطکاکی افزایش می‌یابد. در این تحقیق طول لغزش‌های بزرگتر از ۲۵میکرون گزارش شده و حداکثر سرعت لغزش معادل با ۴۰درصد سرعت متوسط کانال به‌دست آمده است.

در این مقاله ابتدا نمونه‌ای از نانوکامپوزیت آب‌گریز روی ورقه آلومینیوم به روش پاشش، اجرا می‌شود. لازم به ذکر است که روش مورد استفاده دارای سرعت تولید بالایی بوده و قابل استفاده برای تولید سطوح در مقیاس بزرگ می‌باشد. سپس مشخصات آب‌گریزی آن، از جمله اندازه‌گیری طول لغزش ارائه خواهد شد. همچنین همان طور که بیان شد اگرچه برای اندازه‌گیری طول لغزش روش‌ها و تجهیزاتی مثل میکروسکوپ نیروی اتمی و سرعت سنجی به کمک ذرات، در این حوزه مطرح می‌شوند، ولی محدودیت‌هایی مثل هزینه بالای دستگاه، محدودبودن به جریان‌های رینولدز پایین، محدودبودن به سطوح با زبری بسیار کم و محدودیت در اندازه‌گیری مشخصات جریان در زیرلایه لزج باعث شده که این روش‌ها، حساسیت لازم را برای اندازه‌گیری طول لغزش در کاربردهای مربوطه، نداشته باشند. بر این اساس در ادامه برای اندازه‌گیری طول لغزش یک سیستم اندازه‌گیری ارائه شده و به کمک آن طول لغزش پوشش آب‌گریز تولیدشده، تخمین زده می‌شود.

۲- مواد و فرآیندها

۲-۱- مواد اولیه و ابزارهای مورد استفاده

کلیه مواد بدون هیچ گونه خالص‌سازی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، مگر آنکه خلاف آن بیان شود. سیلگارد ۱۸۴، پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان، از شرکت دو کرنینگ خریداری شده است. تولوئن ۹۹/۸درصد از شرکت سیگما آلدریچ تهیه شده است. نانوذرات اکسید سیلیسیم نیز با قطر متوسط ۱۵نانومتر توسط شرکت یو اس نانوریسرچ ارائه شده‌اند. زاویه تماسی استاتیکی و زاویه لغزش به روش بیان شده در منابع [31, 32] و اختراع شماره ۹۳۶۰۳ [33] در دمای ۲۵درجه‌سلسیوس اندازه‌گیری شده‌اند. زاویه تماسی استاتیکی با دقت ۳درجه اندازه‌گیری شده و دقت اندازه‌گیری زاویه لغزش نیز یک درجه می‌باشد. برای اندازه‌گیری از قطره آب مقطر با حجم ۵میکرولیتر استفاده شده است. مقدار متوسط ۱۰ بار اندازه‌گیری در ۱۰ نقطه مختلف از سطح برای زاویه تماسی استاتیکی و زاویه لغزش گزارش شده است. توپوگرافی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد ارزیابی قرار گرفته است. پیش از تصویربرداری از سطح توسط میکروسکوب الکترونی، به کمک دستگاه کندوپاش مغناطیسی یک لایه نازک طلا با ضخامت حدود ۵نانومتر روی نمونه‌ها ایجاد شده است.

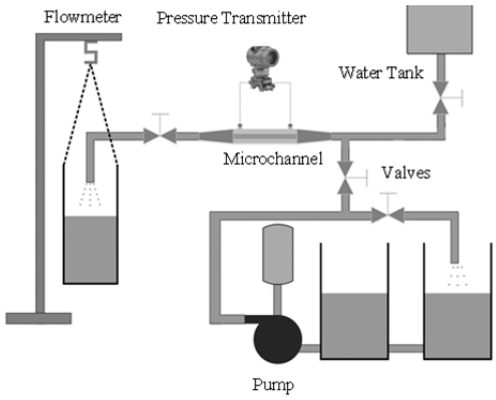
۲-۲- آماده‌سازی نمونه‌های فوق آب‌گریز

برای آماده‌سازی نمونه‌ها مقداری از پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان با غلظت ۱۰درصد در تولوئن حل شده است. سپس مقدار مشخصی از

نانوذارت اکسید سیلیسیم با نسبت وزنی ۱:۱ نسبت به پلیمر به محلول اضافه شده است. به‌منظور جداشدن توده‌های درشت ذرات از یکدیگر محلول آماده‌شده به مدت ۳۰دقیقه با سرعت دورانی ۱۰۰دور در دقیقه در همزن مغناطیسی تحت دوران قرار داده شده است. پس از اعمال تنش برشی بر توده‌های ذرات برای جداشدن نانوذرات از یکدیگر، محلول به مدت ۱۵دقیقه در حمام التراسونیک قرار داده شده است. برای پوشش‌دهی محلول آماده‌شده روی سطح از یک نازل با قطر ۱میلیمتر در فشار ۲/۵بار استفاده شده است. در این شرایط فاصله نازل با صفحه پوشش‌دهی ۲۵سانتی‌متر می‌باشد. سرعت حرکت خطی نازل برای پوشش‌دهی نیز حدوداً معادل با ۲±۸سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. پس از تبخیرشدن حلال در دمای محیط لایه نانوکامپوزیت آماده‌شده در دمای ۱±۱۰۰درجه‌سلسیوس به مدت یک ساعت پخت شده است.

۲-۳- سیستم اندازه‌گیری طول لغزش

از اهداف این تحقیق اندازه‌گیری طول لغزش سطح فوق آب‌گریز تولیدشده می‌باشد. همان طور که پیش‌تر بدان اشاره شد روش جامعی برای اندازه‌گیری طول لغزش سطوح فوق آب‌گریز وجود ندارد. در اینجا روشی برای اندازه‌گیری طول لغزش ارائه شده و به کمک آن طول لغزش نانوکامپوزیت فوق آب‌گریز تولیدشده اندازه‌گیری خواهد شد. روش مورد نظر، استفاده از سیستم اندازه‌گیری طول لغزش سطوح فوق آب‌گریز بوده که در توضیحات مربوط به این دستگاه و روش اندازه‌گیری آن در اختراع شماره ۹۲۷۷۳[34] مرکز مالکیت معنوی، موجود می‌باشد. طرح‌واره نمونه‌ای از این سیستم اندازه‌گیری در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱) طرح‌واره سیستم اندازه‌گیری طول لغزش

این سیستم شامل بخش‌های زیر می‌باشد:

- پمپ یا تانک سیال: برای تأمین فشار سیستم
- سنسورهای دیفرانسیلی فشار: برای اندازه‌گیری افت فشار درون میکروکانال با دقت ۰/۵میلی‌متر ستون آب
- دبی‌سنج: برای اندازه‌گیری دبی عبوری از میکروکانال با دقت ۰/۱گرم بر ثانیه
- اِکومولاتور: برای گرفتن نوسانات ایجادشده توسط پمپ
- شیر ورودی میکروکانال: به‌منظور قطع و وصل دبی ورودی به میکروکانال و تنظیم فشار ورودی به آن
- شیر سوزنی خروجی: به‌منظور تنظیم دبی عبوری از میکروکانال

در این مقاله منظور از میکروکانال یک کانال از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L با فاصله دو دیواره قابل تنظیم بوده که می‌توان این فاصله را در حد ۱۰۰میکرومتر نیز تنظیم نمود. از آنجایی که در جریان آرام روابط تحلیلی برای انجام محاسبات جریان وجود دارند طراحی میکروکانال در رژیم آرام انجام شده است. بنابراین برای ایجاد رژیم آرام و از طرف دیگر افزایش تنش برشی دیواره، فاصله بین صفحات میکروکانال باید کاهش یابد. در این شرایط دیواره‌های میکروکانال می‌توانند تنش‌های برشی بالاتری را تجربه کنند. طراحی میکروکانال نیز به گونه‌ای است که در یک محدوده، امکان افزایش و کاهش فاصله بین دو دیواره کانال (ارتفاع کانال) در آن وجود دارد. زمانی که دیواره‌های میکروکانال آب‌دوست بوده و هیچ گونه مواد آب‌گریزی وجود ندارد، فاصله بین دو دیواره کانال مشخص می‌باشد. در این حالت فاصله بین دو دیواره برابر ضخامت فیلرهای (ورق‌های از جنس استیل نازک که به کمک آن‌ها فاصله دیواره بالا و پایین میکروکانال تنظیم می‌شود) مورد استفاده می‌باشد. اما زمانی که روی دیواره‌های میکروکانال پوشش‌های آب‌گریز قرار گیرند، فاصله بین دو دیواره معادل با ضخامت فیلرها نبوده و این فاصله کمتر از ضخامت فیلرها خواهد بود. از آنجایی که فاصله بین دو دیواره کم می‌باشد و ابزار اندازه‌گیری مناسبی برای اندازه‌گیری فاصله بین دو دیواره در دسترس نمی‌باشد، فاصله بین دو دیواره که یک پارامتر هندسی می‌باشد، به عنوان یک پارامتر مجهول خود را نشان می‌دهد. از طرف دیگر از آنجایی که دیواره‌های مورد استفاده فوق آب‌گریز می‌باشند، پارامتر مجهول دیگری به نام طول لغزش وجود داشته که وابسته به شرایط آزمایش و جنس صفحات فوق آب‌گریز مورد استفاده می‌باشد. تنها معادله قابل استفاده نیز رابطه تحلیلی مربوط به افت فشار- دبی می‌باشد. بنابراین در چنین شرایطی تعیین هم‌زمان ارتفاع میکروکانال و طول لغزش، یا سرعت لغزش ممکن نمی‌باشد. برای حل این مشکل دیواره‌های میکروکانال، مشابه شکل ۲، به دو بخش آب‌دوست و فوق آب‌گریز تقسیم شده‌اند. همان طور که در شکل ۲ مشخص است، در دو بخش میکروکانال دبی عبوری یکسان بوده ولی افت فشار متفاوتی وجود دارد. با استفاده از روابط تحلیلی موجود برای میکروکانال با شرط عدم لغزش و دبی و افت فشار اندازه‌گیری‌شده در بخش بدون لغزش میکروکانال، ارتفاع میکروکانال محاسبه خواهد شد. برای محاسبه ارتفاع میکروکانال، مقدار افت فشار و دبی عبوری از آن اندازه‌گیری شده و با استفاده از رابطه (۱) ارتفاع کانال محاسبه می‌گردد. یادآور می‌شود که رابطه (۱) رابطه افت فشار و دبی عبوری در جریان آرام توسعه‌یافته در یک کانال دوبعدی می‌باشد.

$$Q = \frac{w\Delta P}{12\mu\Delta x} \times H^3 \qquad (۱)$$

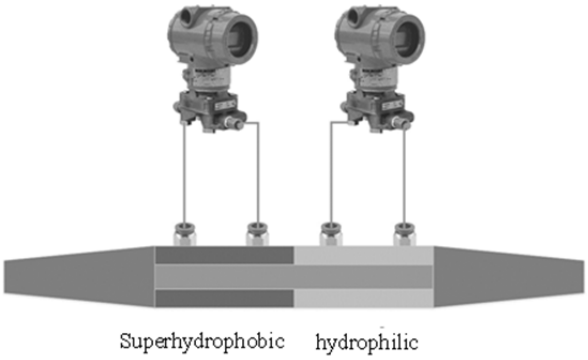
پس از محاسبه ارتفاع کانال از رابطه (۱) با استفاده از دبی و افت فشار اندازه‌گیری‌شده در بخش دارای لغزش (شکل ۲ و شکل ۳) و استفاده از رابطه تحلیلی مربوط به جریان آرام توسعه‌یافته در کانال دارای شرط مرزی لغزش (رابطه ۲)، طول لغزش محاسبه خواهد شد.

$$Q = \frac{2wh^3}{3\mu}\frac{\Delta \mathrm{p}}{\Delta x} + \frac{2wh^3\mathrm{b}}{\mu(2h+b)}\frac{\Delta \mathrm{P}}{\Delta x} \qquad (۲)$$

رابطه (۲) دبی و افت فشار را در جریان آرام توسعه‌یافته در کانال با شرط مرزی لغزش به یکدیگر مربوط می‌کند. در استخراج رابطه بالا فرض شده است که فقط دیواره پایین میکروکانال دارای شرط مرزی لغزش می‌باشد. همچنین برای اعمال شرط مرزی لغزش از مدل ناویر استفاده شده است. مدل ناویر در رابطه (۳) ذکر شده که در آن b طول لغزش می‌باشد.

$$u_{\mathrm{slip}} = \mathrm{b}\frac{\partial u}{\partial y} \qquad (۳)$$

به این ترتیب دو مجهول موجود در میکروکانال، یعنی ارتفاع میکروکانال و طول لغزش محاسبه می‌شوند.



شکل ۲) اندازه‌گیری افت فشار در بخش‌های آب‌گریز و آب‌دوست میکروکانال

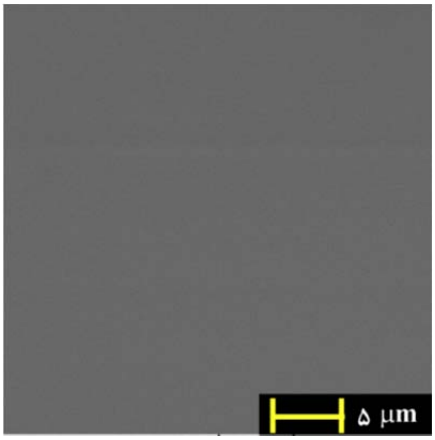
شکل ۳) پروفیل‌های سرعت در بخش آب‌دوست و بخش آب‌گریز میکروکانال

۳- نتایج

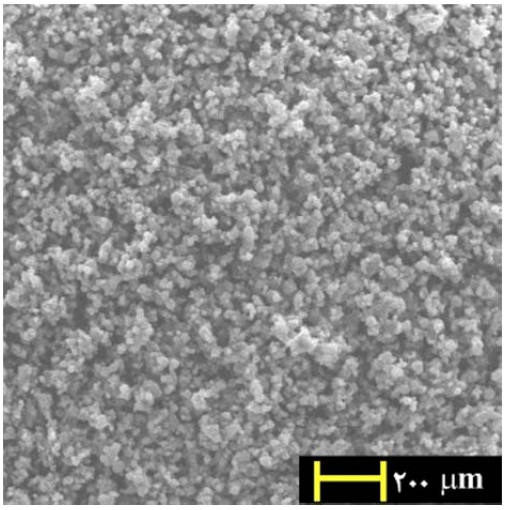
دستیابی به روش‌های ساده و قابل اجرا برای تولید سطوح فوق آب‌گریز در مقیاس بزرگ برای کاربردهای مهندسی مثل کاهش پسای اصطکاکی ضروری می‌باشد. در این بخش روشی برای تولید نانوکامپوزیت فوق آب‌گریز با ساختارهای سطحی سلسله‌ای ارائه شده است. به کمک روش ارائه‌شده ساختارهای سلسله‌ای سطحی بدون هیچ گونه فرآیند پیچیده‌ای تولید می‌شوند. این فرآیند بر اساس پاشش نانوذرات آب‌گریز اکسید سیلیسیم و پلیمر پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان روی سطح می‌باشد. اگرچه تاکنون روش‌های زیادی برای تولید سطوح فوق آب‌گریز ارائه شده است ولی اکثر این روش‌ها، (۱) معمولاً پیچیده و زمان‌بر بوده و شامل فرآیندهای مشکلی می‌باشند، (۲) فقط در شرایط استاتیکی مناسب بوده و دوام مناسبی برای استفاده در مقابل جریان سیال را ندارند و (۳) فقط تولید در مقیاس آزماشیگاهی را پوشش داده و برای تولید سطوح در مقیاس بزرگ و کاربردی مناسب نمی‌باشند. به کمک روش ارائه‌شده می‌توان سطوح فوق آب‌گریز را به راحتی در مقیاس بزرگ تولید کرد. بعلاوه همان طور که بیان شد طول لغزش سطوح فوق آب‌گریز از مشخصه‌های مهم و کابردی این سطوح بوده که روش جامعی برای اندازه‌گیری آن وجود ندارد. در این مقاله اندازه‌گیری طول لغزش پوشش نانوکامپوزیت پلیمری فوق آب‌گریز، به کمک سیستم اندازه‌گیری طول لغزش ساخته‌شده، انجام خواهد شد.

۳-۱-ساختارهای سطح

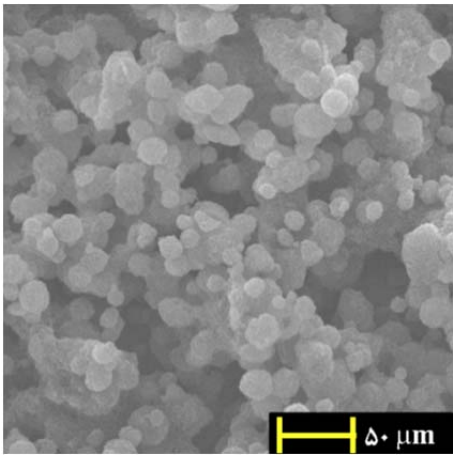
ساختار سطح نانوکامپوزیت پوشش داده‌شده به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفته است. تصاویری از سطح دارای پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (شکل ۴) و سطح دارای پوشش پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان/اکسید سیلیسیوم در مقیاس‌های مختلف (شکل‌های ۵ تا ۷) نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود روی سطح پلی دی متیل سیلوکسان صاف هیچ گونه زبری در مقیاس میکرو مشاهده نمی‌گردد. برخلاف آن سطح نمونه دارای پوشش نانوکامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان بوده که در اثر پوشش‌دهی زبری‌های سلسله‌ای را در مقیاس‌های مختلف از خود نشان داده است (شکل‌های ۵ تا ۷). همان طور که در این شکل‌ها مشخص است، پوشش ایجادشده یکنواخت بوده و دارای زبری‌هایی با توزیع تصادفی می‌باشد. همچنین، روی سطح تعداد زیادی حفره با ابعاد ۵۰-۱۰میکرون مشاهده می‌گردد. این حفره‌ها با به دام‌انداختن هوا درون خود، باعث افزایش عملکرد سطح در مقابل جریان سیال خواهند شد. علاوه بر حفره‌های سطحی، ذرات شبه‌کروی فراوانی با قطر حدود ۱۰-۵میکرون مشاهده می‌شود (شکل ۷). حضور این ساختارها باعث کاهش زاویه لغزش (افزایش ناپایداری قطره آب روی سطح) خواهد شد. لازم به ذکر است که این ذرات مجموعه‌ای از ذرات با ابعاد نانومتری بوده که به یکدیگر چسبیده‌اند. یادآور می‌شود که وجود ساختارهای سلسله‌ای در مقیاس‌های مختلف باعث افزایش عملکرد سطوح فوق آب‌گریز در جریان سیال خواهد شد. به عبارت دیگر وجود ساختارهای سطحی در مقیاس‌های مختلف می‌تواند باعث افزایش زاویه تماسی استاتیکی، کاهش زاویه لغزش، افزایش مقدار کاهش پسای حاصل‌شده و افزایش پایداری سطح در مقابل جریان سیال شود.



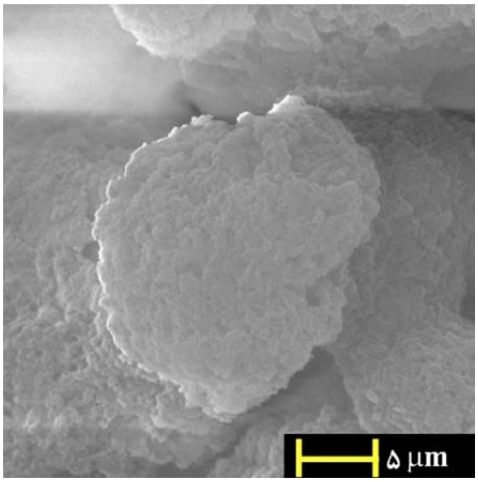
شکل ۴) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح صاف پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان



شکل ۵) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نانوکامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان/اکسید سیلیسیم



شکل ۶) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نانوکامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان/اکسید سیلیسیم



شکل ۷) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نانوکامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان/اکسید سیلیسیم

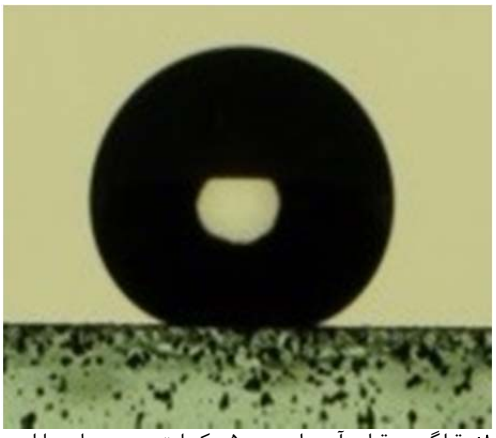
۲-۳- زاویه تماسی استاتیکی و لغزش

شکل ۸ نشان‌دهنده قطره آب قرار داده‌شده روی نمونه دارای پوشش پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و نانو ذرات اکسید سیلیسیم می‌باشد. همان طور که در این تصویر مشخص است قطره آب قرار داده‌شده روی سطح تقریباً حالت کروی به خود گرفته است. اندازه‌گیری زاویه تماسی استاتیکی و لغزش حداقل روی ۱۰ نقطه از سطح انجام شده و عدد گزارش‌شده متوسط ۱۰ اندازه‌گیری مختلف در نقاط متفاوت می‌باشد. زاویه تماسی استاتیکی قطره آب مقطر با حجم ۵میکرولیتر روی سطح پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان صاف حدود ۱±۱۱۲درجه می‌باشد. این سطح دارای زاویه لغزش نبوده و قطره آب روی آن به صورت چسبیده به سطح باقی می‌ماند. این درحالی است که زاویه تماسی سطح دارای نانوپوشش پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان و اکسید سیلیسیم دارای زاویه تماسی استاتیکی ۳±۱۶۲درجه و زاویه لغزش ۱±۴درجه می‌باشد.

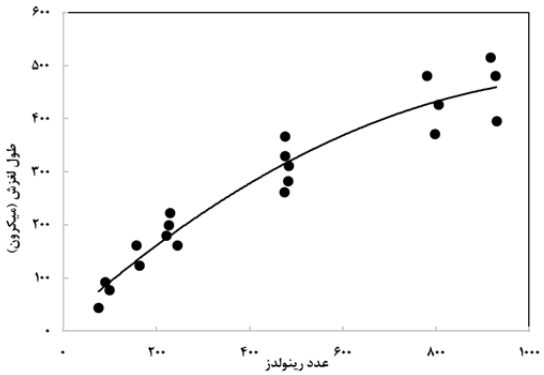
۳-۳- اندازه‌گیری طول لغزش

همان طور که در بخش‌های قبل بدان اشاره شد از اهداف مهم این مقاله اندازه‌گیری طول لغزش سطح دارای پوشش فوق آب‌گریز پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان به کمک سیستم اندازه‌گیری طول لغزش اختراع ثبت‌شده به شماره ۹۲۷۷۳[34]، می‌باشد. بدین منظور از نمونه‌های ورق آلومینیومی با ابعاد ۲۰×۱۰سانتی‌متر استفاده شده و پوشش فوق آب‌گریز روی آن ایجاد شده است. سپس ورق آلومینیوم پوشش داده‌شده روی دیواره‌های میکروکانال نصب شده و اندازه‌گیری افت فشار در دو بخش آب‌گریز و آب‌دوست آن انجام شده است. کلیه آزمایش‌ها در محدوده فشار استاتیکی معادل ۵-۱۰متر آب انجام شده‌اند. کل مدت زمان مربوط به اندازه‌گیری طول لغزش حدود ۶۰دقیقه می‌باشد. در بازه زمانی مورد آزمایش نمونه‌ها پایدار بوده و آسیب‌دیدن پوشش‌ها مشاهده نشده است. لازم به ذکر است که دوام استاتیکی این سطوح در زیر آب به مدت یک هفته انجام شده و کاهش زاویه استاتیکی و افزایش زاویه لغزش مشاهده نشده است. برای ایجاد دبی‌های کم از تانک سیال به عنوان منبع تأمین جریان استفاده شده و برای ایجاد دبی‌های بزرگتر از پمپ استفاده شده است (شکل ۱). ابتدا با اندازه‌گیری دبی عبوری و افت فشار مربوط به بخش آب‌دوست میکروکانال (بخشی از میکروکانال که شرط عدم لغزش روی دیواره‌های آن برقرار است) ارتفاع مربوط به کانال محاسبه می‌شود (رابطه ۱). سپس با اندازه‌گیری دبی عبوری و افت فشار بخش فوق آب‌گریز (بخش دارای لغزش روی دیواره پایین) و استفاده از ارتفاع به‌دست آمده از بخش قبل، طول لغزش محاسبه می‌شود (رابطه ۲). منحنی طول لغزش به‌دست آمده در نمودار ۱ نشان داده شده است. در این شکل طول لغزش به‌دست آمده بر حسب عدد رینولدز ($\mathrm{Re}=\mathrm{UH}/\upsilon$) جریان ترسیم شده است. U، H و υ به ترتیب سرعت متوسط جریان، ارتفاع کانال و لزجت سینماتیکی سیال می‌باشند. همان طور که در نمودار ۱ مشخص است با استفاده از پوشش ایجادشده دستیابی به طول لغزش حدود ۵۰۰میکرون در عدد رینولدز حدود ۹۳۰ (متناسب با تنش برشی حدود ۷/۳پاسکال) امکان‌پذیر می‌باشد. مقدار کاهش پسای به‌دست آمده نیز حدود ۵۰درصد در عدد رینولدز حدود ۹۳۰ می‌باشد. به‌منظور مقایسه مقدار کاهش به‌دست آمده، می‌توان به نتایج مربوط به کاهش پسای یک کانال که در محدوده عدد رینولدز ۲۰۰ تا ۴۶۰۰ انجام شده است، اشاره کرد. حداکثر مقدار کاهش پسای گزارش‌شده در این تحقیق ۳۰درصد می‌باشد[35]. البته بیشترین مقدار کاهش پسای گزارش‌شده مربوط به اندازه‌گیری جریان روی صفحه تخت بوده که مقدار ۷۵درصد در رینولدز اصطکاکی ۲۵۰ بوده است[36]. لازم به ذکر است که روش‌های مورد استفاده در این گزارش‌ها روش‌های فوتولیتوگرافی بوده که در حال حاضر محدود به نمونه‌های کوچک می‌باشند. این درحالی است که روش پوشش‌دهی ارائه‌شده در این مقاله، قابل اجرا روی سطح بزرگ می‌باشد. نکته مهم دیگری که از منحنی طول لغزش- عدد رینولدز استخراج می‌شود، کاهش شیب منحنی طول لغزش با افزایش عدد رینولدز می‌باشد. این رفتار کاهشی در شیب منحنی نشان‌دهنده آن است که اگرچه با افزایش عدد رینولدز (یا تنش برشی جریان) طول لغزش افزایش می‌یابد ولی افزایش آن با حداکثر عملکرد سطح فوق آب‌گریز محدود می‌گردد. به عبارت دیگر زمانی که در جریان سیال کاهش پسای اصطکاکی به حداکثر مقدار ممکن خود می‌رسد، افزایش طول لغزش نیز متوقف شده و در صورت عدم تخریب پوشش فوق آب‌گریز در مقابل جریان، رفتاری کاهشی در شیب منحنی طول لغزش بر حسب عدد رینولدز را از خود نشان خواهد داد. یکی از نکاتی که در رابطه با نوسانات مشاهده‌شده در نمودار ۱ می‌توان مطرح کرد، وجود فیلم هوا روی دیواره کانال بوده که مقدار آن می‌تواند کاهش و یا افزایش داشته و نوساناتی را داشته باشد. همین موضوع روی نتایج اندازه‌گیری فشار و به دنبال آن طول لغزش اثرگذار خواهد بود. پرداختن به این موضوع نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی ویژه‌ای داشته که هدف این آزمایش‌ها نبوده است. علت دیگر نوسانات موجود در نتایج ارائه

شده در نمودار ۱ مربوط به این موضوع می‌باشد که با افزایش و کاهش دبی مقدار جزئی هوا وارد سنسورهای فشار شده و همین موضوع نتایج را تحت تأثیر قرار می‌دهد. البته هنگام اندازه‌گیری سعی شده که در هر مرحله تا حد امکان هواگیری انجام شود.



شکل ۸) قرارگیری قطره آب با حجم ۵میکرولیتر روی سطح دارای پوشش نانوکامپوزیت پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان/اکسید سیلیسیم



نمودار ۱) رابطه طول لغزش اندازه‌گیری‌شده بر حسب عدد رینولدز جریان

۴- نتیجه‌گیری

همان طور که در بخش‌های قبل بیان شد هدف از انجام این تحقیق تولید سطوح فوق آب‌گریز قابل استفاده در کاربردهای صنعتی مثل کاهش پسای اصطکاکی اجسام غوطه‌ور می‌باشد. بعلاوه اندازه‌گیری طول لغزش سطوح فوق آب‌گریز به عنوان مشخصه کاربردی این سطوح که موضوعی چالش‌برانگیز بوده است، در اینجا به کمک سیستم اندازه‌گیری ارائه‌شده مورد اندازه‌گیری قرار گرفته است. تصاویر مربوط به پوشش فوق آب‌گریز نشان‌دهنده وجود زبری‌های سلسله‌ای و حفره‌های سطحی مناسب برای دستیابی به کاهش پسای اصطکاکی بوده و همین امر باعث بروز زاویه لغزش زیر ۵درجه شده است. همچنین، اندازه‌گیری‌های انجام‌شده نشان‌دهنده آن است که طول لغزش به‌دست آمده به کمک این سطوح در محدوده عدد رینولدز مورد آزمایش حدوداً معادل با ۵۰۰-۴۰میکرون می‌باشد. لازم به ذکر است که طول لغزش به‌دست آمده مقدار بزرگ و قابل توجهی بوده که ناشی از وجود ساختارها و حفره‌های سطحی در مقیاس‌های مختلف می‌باشد. بعلاوه نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده دستیابی به کاهش پسای حدود ۵۰درصد در عدد رینولدز ۹۳۰ می‌باشد. نتایج به‌دست آمده نشان‌دهنده آن است که می‌توان به جای تمرکز روی روش‌های تولید بسیار دقیق مثل فوتولیتوگرافی از مزیت روش‌های اجرای سطح به صورت کامپوزیت بهره برد و بدین شکل فناوری را در مسیری توسعه داد که بتوان از خاصیت فوق آبگریزی برای نمونه‌های صنعتی دارای سطح مقطع بزرگ استفاده کرد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
تاییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.
سهم نویسندگان: محمد سعادت‌بخش (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۵۰%)؛ نوروز محمد نوری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰%)
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشد.

۵- فهرست علایم

b	طول لغزش (m)
H	ارتفاع میکروکانال (m)
$h = H/2$	نصف ارتفاع میکروکانال (m)
ΔP	افت فشار درون میکروکانال ($kgm^{-1}s^{-2}$)
Q	دبی عبوری از میکروکانال (m^3s^{-1})
$\mathrm{Re} = \rho UH/\mu$	عدد رینولدز
u_{slip}	سرعت لغزش روی مرز جامد (ms^{-1})
$\partial u/\partial y$	گرادیان سرعت عمود بر دیواره (s^{-1})
Δx	فاصله طولی اندازه‌گیری افت فشار (m)
علایم یونانی	
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ρ	چگالی (kgm^{-3})
زیرنویس‌ها	
$slip$	لغزش

منابع

1- Feng L, Li S, Li Y, Li H, Zhang L, Zhai J, et al. Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial. Advanced Materials. 2002;14(24):1857-1860.
2- Lafuma A, Quéré D. Superhydrophobic states. Nature Materials. 2003;2:457-460.
3- Blossey R. Self-cleaning surfaces—virtual realities. Nature Materials. 2003;2:301-306.
4- Genzer J, Efimenko K. Recent developments in superhydrophobic surfaces and their relevance to marine fouling: A review. Biofouling. 2006;22(5):339-360.
5- Ma M, Hill RM, Lowery JL, Fridrikh SV, Rutledge GC. Electrospun poly (Styrene-block-dimethylsiloxane) block copolymer fibers exhibiting superhydrophobicity. Langmuir. 2005;21(12):5549-5554.
6- Agarwal S, Horst S, Bognitzki M. Electrospinning of fluorinated polymers: Formation of superhydrophobic surfaces. Macromolecular Materials and Engineering. 2006;291(6):592-601.
7- Ogawa T, Ding B, Sone Y, Shiratori S. Super-hydrophobic surfaces of layer-by-layer structured film-coated electrospun nanofibrous membranes. Nanotechnology. 2007;18(16):165607.
8- Shirtcliffe NJ, McHale G, Newton MI, Perry CC, Roach P. Superhydrophobic to superhydrophilic transitions of sol–gel films for temperature, alcohol or surfactant measurement. Materials Chemistry and Physics. 2007;103(1):112-117.
9- Li X, Chen G, Ma Y, Feng L, Zhao H, Jiang L, et al. Preparation of a super-hydrophobic poly (vinyl chloride) surface via solvent–nonsolvent coating. Polymer.

transparent superhydrophobic surfaces from the coassembly of nanoparticles (≤ 100 nm). Langmuir. 2011;27(8):4594-4602.
24- Deng X, Mammen L, Zhao Y, Lellig P, Müllen K, Li C, et al. Transparent, thermally stable and mechanically robust superhydrophobic surfaces made from porous silica capsules. Advanced Materials. 2011;23(26):2962-2965.
25- Michielsen S, Lee HJ. Design of a superhydrophobic surface using woven structures. Langmuir. 2007;23(11):6004-6010.
26- Xie Q, Xu J, Feng L, Jiang L, Tang W, Luo X, et al. Facile creation of a super‐amphiphobic coating surface with bionic microstructure. Advanced Materials. 2004;16(4):302-305.
27- Liu Y, Tang J, Wang R, Lu H, Li L, Kong Y, et al. Artificial lotus leaf structures from assembling carbon nanotubes and their applications in hydrophobic textiles. Journal of Materials Chemistry. 2007;(11):1071-1078.
28- Wang T, Hu X, Dong S. A general route to transform normal hydrophilic cloths into superhydrophobic surfaces. Chemical Communications. 2007;(18):1849-1851.
29- Maali A, Bhushan B. Slip-length measurement of confined air flow using dynamic atomic force microscopy. Physical Review E. 2008;78(2):027302.
30- Daniello RJ, Waterhouse NE, Rothstein JP. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces. Physics of Fluids. 2009;21(8):085103.
31- Nouri NM, Saadat Bakhsh M, Bagheri R. Robust superhydrophobic surface with polytetrafluoroethylene (PTFE), micro sized aluminum particles and SiO2 nano-particles. Modares Mechanical Engineering. 2016;15(11):26-32. [Persian]
32- Nouri NM, Shamsi M, Saadat Bakhsh M. Hydrophobic coating of aluminum flake particles and application of these particles to produce superhydrophobic surfaces. Modares Mechanical Engineering. 2016;16(4):289-296. [Persian]
33- Sekhavat S, Nouri NM, Hatam Sh, inventors. Using of an electric stepper motor to measure the dynamic contact angle of the droplet. Iran Patent 93603. 2018. [Unknown Language]
34- Saadat Bakhsh M, Nouri NM, Foshat S, inventors. Slip lingth measurement system of the superhydrophobic surfaces. Iran Patent 92773. 2017. [Unknown Language]
35- Jung YC, Bhushan B. Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows. Journal of Physics: Condensed Matter. 2010;22(3):035104.
36- Park H, Sun G, Kim CJ. Superhydrophobic turbulent drag reduction as a function of surface grating parameters. Journal of Fluid Mechanics. 2014;747:722-734.
2006;47(2):506-509.
10- Shi F, Song Y, Niu J, Xia X, Wang Z, Zhang X. Facile method to fabricate a large-scale superhydrophobic surface by galvanic cell reaction. Chemistry of Materials. 2006;18(5):1365-1368.
11- Han JT, Jang Y, Lee DY, Park JH, Song SH, Ban DY, et al. Fabrication of a bionic superhydrophobic metal surface by sulfur-induced morphological development. Journal of Materials Chemistry. 2005;15(30):3089-3092.
12- Baldacchini T, Carey JE, Zhou M, Mazur E. Superhydrophobic surfaces prepared by microstructuring of silicon using a femtosecond laser. Langmuir. 2006;22(11):4917-4919.
13- Lacroix LM, Lejeune M, Ceriotti L, Kormunda M, Meziani T, Colpo P, et al. Tuneable rough surfaces: A new approach for elaboration of superhydrophobic films. Surface Science. 2005;592(1-3):182-188.
14- Wang MF, Raghunathan N, Ziaie B. A nonlithographic top-down electrochemical approach for creating hierarchical (micro− nano) superhydrophobic silicon surfaces. Langmuir. 2007;23(5):2300-2303.
15- Yoshimitsu Z, Nakajima A, Watanabe T, Hashimoto K. Effects of surface structure on the hydrophobicity and sliding behavior of water droplets. Langmuir. 2002;18(15):5818-5822.
16- Xie Q, Fan G, Zhao N, Guo X, Xu J, Dong J, et al. Facile creation of a bionic super-hydrophobic block copolymer surface. Advanced Materials. 2004;16(20):1830-1833.
17- Zhu Y, Zhang J, Zheng Y, Huang Z, Feng L, Jiang L. Stable, superhydrophobic, and conductive polyaniline/polystyrene films for corrosive environments. Advanced Functional Materials. 2006;16(4):568-574.
18- Manoudis PN, Karapanagiotis I, Tsakalof A, Zuburtikudis I, Panayiotou C. Superhydrophobic composite films produced on various substrates. Langmuir. 2008;24(19):11225-11232.
19- Chen A, Peng X, Koczkur K, Miller B. Super-hydrophobic tin oxide nanoflowers. Chemical Communications. 2004;(17):1964-1965.
20- Shibuichi S, Yamamoto T, Onda T, Tsujii K. Super water-and oil-repellent surfaces resulting from fractal structure. Journal of Colloid and Interface Science. 1998;208(1):287-294.
21- Sakaue H, Tabei T, Kameda M. Hydrophobic monolayer coating on anodized aluminum pressure-sensitive paint. Sensors and Actuators B: Chemical. 2006;119(2):504-511.
22- Li Y, Huang XJ, Heo SH, Li CC, Choi YK, Cai WP, et al. Superhydrophobic bionic surfaces with hierarchical microsphere/SWCNT composite arrays. Langmuir. 2007;23(4):2169-2174.
23- Karunakaran RG, Lu CH, Zhang Z, Yang S. Highly